

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**“ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE REQUERIMIENTO DE SOPORTE Y
FORTIFICACIÓN DE TÚNELES DEFINIDO SEGÚN METODOS EMPIRICOS
DE CLASIFICACIÓN GEOMECANICA Y ANÁLISIS NUMÉRICOS”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

CARLOS CRUZ ORDOÑEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERÍA DE MINAS

**PUNO - PERÚ
2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

“ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE REQUERIMIENTO DE SOPORTE Y FORTIFICACIÓN DE TÚNELES DEFINIDO SEGÚN METODOS EMPIRICOS DE CLASIFICACIÓN GEOMECANICA Y ANÁLISIS NUMÉRICOS”

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

CARLOS CRUZ ORDOÑEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERÍO DE MINAS

APROBADO POR:

PRESIDENTE

:

Dr. Juan Mayhua Palomino

PRIMER MIEMBRO

:

Ing. David Velasquez Medina

SEGUNDO MIEMBRO

:

M.sc. Lucio Quea Gutierrez

TEMA: Mecánica de rocas, geomecánica y geotecnia

ÁREA: Ingeniería de Minas

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 29 de octubre del 2019

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios, quien me guía en los caminos trazados por él; a mis padres Jaime Andrés Cruz Ascencio y Valeriana Ordoñez Huancalaque; con su amor y esfuerzo ha hecho posible formar un profesional de mí.

A todos ustedes es una satisfacción y un privilegio dedicarles, con alegrías y entusiasmo personal, profesional y también intelectual, los cientos de horas invertidas en este trabajo de investigación, que no es más que la evidencia de la muestra de mi amor y cariño hacia ustedes.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco infinitamente a Dios, quien me protegió, me iluminó y me dio las fuerzas para superar todas las dificultades que se me presentaron, permitiéndome alcanzar una de las metas en mi vida.

Asimismo, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por sus concejos y sabias enseñanzas que me impartieron dentro de las aulas Universitarias.

A la Universidad Nacional del Altiplano Puno, mi Alma Mater que me tuvo entre sus aulas durante los años de mi formación profesional, otorgándome parte del conocimiento que eh adquirido y que me servirá en mi desenvolvimiento profesional.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Descripción de escenarios de macizos rocosos considerados sobre diagrama GSI.....	12
Figura 2-1. Tiempo de estabilidad de excavación sin soporte	12
Figura 2-2. Relación entre Q y ESR y sostenimiento recomendado (Barton, 1989).....	12
Figura 2-3. Relación entre Q y ESR y sostenimiento recomendado (Barton, 1989).....	13
Figura 2-4. Esfuerzo principal mayor alrededor del túnel	14
Figura 2-5. Esfuerzo principal menor alrededor del túnel en MPa.....	14
Figura 2-6. Presiones del terreno en los hastiales y el techo del túnel	14
Figura 2-7. Diagramas de Momento (Kg-m) de la Cercha.....	14
Figura 2-8. Diagramas de Fuerza Cortante (Kg) de la Cercha	14
Figura 2-9. Diagramas de Fuerza Axial (Kg) de la Cercha.....	15
Figura 2-10. Diseño de sostenimiento vista frontal	15
Figura 2-11. Diseño de sostenimiento vista transversal.....	15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Recolección de datos.....	13
Tabla 1-2. Análisis de resultados según métodos empíricos.....	13
Tabla 1-3. Cerchas Metálicas Tipo Omega.....	15

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN MODALIDAD ARTÍCULO CIENTIFICO**ÍNDICE GENERAL**

	Pág.
DEDICATORIA	03
AGRADECIMIENTO	04
ÍNDICE DE FIGURAS	05
ÍNDICE DE TABLAS	06
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
1. TITULO.....	08
2. AUTORES, AFILIACIÓN Y DIRECCIÓN INSTITUCIONAL.....	08
3. RESUMEN.....	08
4. PALABRAS CLAVE.....	08
5. INTRODUCCIÓN.....	09
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	09
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
8. CONCLUSIÓN.....	15
9. AGRADECIMIENTOS.....	15
10. LITERATURA CITADA (Estilo APA y utilizando el software Mendeley).....	15



MECÁNICA DE ROCAS, GEOMECÁNICA Y GEOTECNIA



ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE REQUERIMIENTO DE SOPORTE Y FORTIFICACIÓN DE TÚNELES DEFINIDO SEGÚN METODOS EMPIRICOS DE CLASIFICACIÓN GEOMECANICA Y ANÁLISIS NUMÉRICOS

COMPARATIVE STUDY BETWEEN SUPPORT REQUIREMENT AND FORTIFICATION OF TUNNELS DEFINED ACCORDING TO EMPIRICAL METHODS OF GEOMECHANICAL CLASSIFICATION AND NUMERICAL ANALYSIS

Bach. Carlos Cruz Ordoñez¹

Universidad Nacional del Altiplano – Puno
Facultad de Ingeniería de Minas

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es el planeamiento y diseño de sostenimiento más adecuado mediante un enfoque de análisis numéricos y métodos empíricos de la clasificación geomecánica en el Proyecto Tambomayo, ubicado en el distrito de Castilla en el departamento de Arequipa, que permitirá establecer algunas pautas sencillas de diseño que pueden facilitar futuras estimaciones de sostenimiento, con la finalidad de proponer mejoras y disminuir las diferencias que en la actualidad se producen entre el diseño previsto y el instalado, que repercutirá en resultados eficientes en la ejecución, los cuales darán como resultado en la mejora de la gestión y evaluar el comportamiento físico-mecánico del macizo rocoso circundante al proyecto; en este trabajo se aborda el estudio del sostenimiento en varios aspectos: en primer lugar se revisan algunos de los métodos de diseño más reconocidos; luego se aplican a varias formaciones distintas. Los parámetros geotécnicos y Geomecánicos dan como resultado el diseño del tipo de sostenimiento para el macizo rocoso, la caracterización geomecánica del proyecto dio como resultado la calidad del macizo rocoso, según RMR_{89} , y como dominio geotécnico de las propiedades de las discontinuidades dio el tipo de falla por el efecto cuña estimando los niveles de presiones en el perímetro del túnel que ejerce el material, las presiones varían entre 0.08 MPa en los hastiales y 0.26 MPa en la bóveda del túnel. Por con siguiente, se aplicará el sostenimiento por refuerzo activo, estableciendo los lineamientos y consideraciones técnicas para el pre-sostenimiento, diseño de sostenimiento definitivo para garantizar la estabilidad a largo plazo, controlando los peligros por desprendimiento de rocas y elevando el factor de seguridad en el proyecto.

¹ CARLOS CRUZ ORDOÑEZ.

Bachiller de la Facultad de
Ingeniería de Minas

Universidad Nacional del Altiplano
carlos.cruz.odz@gmail.com

Palabras clave: Sostenimiento, clasificaciones geomecánicas, método empírico, método numérico.

ABSTRAC

The objective of the present investigation is the planning and design of more adequate support through a numerical analysis approach and empirical methods of the geomechanical classification in the Tambomayo Project, located in the district of Castilla in the department of Arequipa, which will allow to establish some guidelines simple design that can facilitate future sustainability estimates, in order to propose improvements and reduce the differences that currently occur between the planned and installed design, which will have an impact on efficient execution results, which will result in the improvement of management and evaluate the physical-mechanical behavior of the rock mass surrounding the project; This paper addresses the study of sustainability in several aspects: first, some of the most recognized design methods are reviewed; then they apply to several

different formations. The geotechnical and Geomechanical parameters result in the design of the type of support for the rock mass, the geometric characterization of the project resulted in the quality of the rock mass, according to RMR89, and as a geotechnical domain of the properties of the discontinuities gave the type of It fails due to the wedge effect estimating the pressure levels in the perimeter of the tunnel that the material exerts, the pressures vary between 0.08 MPa in the gables and 0.26 MPa in the tunnel vault. Therefore, the active reinforcement support will be applied, establishing the guidelines and technical considerations for the pre-support, definitive support design to guarantee long-term stability, controlling the dangers due to rockfall and raising the safety factor in the project.

Key words: Support, geomechanical classifications, empirical method, numerical method

INTRODUCCIÓN

Describir las masas de roca y las condiciones del suelo desde un punto de vista técnico no es fácil. La tarea como ingenieros, nos sentimos más seguros cuando trabajamos con números que con adjetivos, ya que es complicado acoplar adjetivos de diferentes parámetros cuando se necesitan cálculos. Por lo tanto, en una etapa temprana en el desarrollo de la mecánica de rocas, varios sistemas de clasificación y los llamados métodos de túnel fueron presentado en diferentes países. (Palmstrom & Broch, 2006)

La finalidad de este trabajo de ingeniería es realizar un estudio comparativo de los requerimientos de soporte para la excavación de una sección de túnel de una sección de galería de 3.0 x 3.0 m y una longitud de 11m partir de diferentes métodos empíricos de clasificación geomecánica, comparándolos entre sí y con los resultados obtenidos a partir de métodos empíricos y numéricos (Método de elementos finitos). Las presiones laterales en la bóveda del túnel serán elevadas por con siguiente, se aplicará el sostenimiento por refuerzo activo.

Se inicia a través de los análisis de los altos índices de accidentabilidad que con lleva a la gerencia de línea con su personal garantizar la estabilidad de las labores mineras subterráneas a controlar a través del sostenimiento. A emplear en los primeros compases de un proyecto, o como complemento a otros métodos. Se basan en las clasificaciones geomecánicas R.M.R. de Bieniawski (Bieniawski, 1993), Q e Barton. (Barton, 2002), basados en la discretización del macizo rocoso (continuo) en elementos sobre los que se aplicará la ley de la Elasticidad.

Los métodos empíricos se desarrollaron de forma independiente a principios de los años 70 (en el caso del RMR y Q) y posteriormente a principios de la década pasada con el propósito común de cuantificar preliminarmente las características del macizo rocoso en base a descripciones geológicas cuantitativas. (Martinench, 2014)

En la industria minera que estos esquemas se aplican a las etapas tempranas de un proyecto, cuando no se cuenta con suficientes antecedentes geotécnicos o como una herramienta

complementaria, aplicada en forma adecuada y criteriosa, como parte de los análisis disponibles para los ingenieros en la definición de los requerimientos de soporte de túneles. Efectivamente, las limitaciones inherentes de estas metodologías y la importancia de su uso criterioso para fines de ingeniería son ampliamente comentado en la literatura. Tal como es enunciado por (Agency, 1972)

Uno de los intentos por caracterizar macizos rocosos diaclasados es el Geological Strength Index (GSI), desarrollado en (E. Hoek & Brown, 2019) y (Marinos, Marinos, & Hoek, 2007) en base a la experiencia práctica y observación en terreno.

En la ejecución y puesta a punto de obras de gran envergadura, como son los túneles, existen problemas que van surgiendo a medida que avanza la obra. Pero en dichas obras los problemas también existen (y no en menor escala) antes de comenzar con la misma, en la descripción del proyecto básico más concretamente. A veces esos problemas en el proyecto básico vienen por falta de información; otras por la enorme envergadura de esas obras; otras por haber realizado un pobre y rápido proyecto básico; en ocasiones, también por falta de presupuesto destinado a investigación geológica y geotécnica previa; y, como no, aunque son las menos ocasiones, por escasa o incompleta cualificación y/o formación de los técnicos que realizan el proyecto. (Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica, 2016).

El procedimiento regular para evaluar y controlar el comportamiento del macizo rocoso frente a las aberturas de las explotaciones, es utilizar los métodos empíricos de sostenimiento y si es posible realizar simulaciones del comportamiento tenso-deformacionales del macizo rocoso circundante a las aberturas y diseñar debidamente teniendo en cuenta el factor de seguridad y la adecuada recuperación del mineral. (Calcina, 2018)

Desarrollar los procedimientos para un óptimo ciclo de trabajo en tunelería, considerando la calidad y tipo de roca que comprenda el proyecto, así como la selección de los elementos de sostenimiento que sean requeridos. (Abad & Huisa, 2011)

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, las fallas en túneles a menudo ocasionan daños materiales extensos y a veces pérdida de vidas, en la ejecución de soporte y fortificación de túneles es fundamental minimizar y compensar el diseño previsto y el instalado al máximo posible, debido a consideraciones económicas que son fundamental para la operación, es por eso que antes de cambiar la un diseño de soporte y fortificación se recomienda realizar estudios y optar por el mejor método para poder mejorar y evitar daños colaterales.

Una de las razones por el diseño de sostenimiento constituye uno de los factores críticos en el diseño de la mina y está asociado directamente con la economía y seguridad. El objetivo de este trabajo fue evaluar la es analizar el diseño de sostenimiento en grandes túneles, con el fin de mostrar la variabilidad en las propuestas según el autor en que se base el diseño o la clasificación geomecánica utilizada. Utilizando métodos empíricos de clasificación geomecánica, Métodos de Elementos Finitos (MEF)

2. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

2.1 TIPO DE ESTUDIO

En el desarrollo de la presente investigación se utilizará el método analítico descriptivo, debido a que se presenta la problemática que afronta la investigación identificado como caracterización del macizo rocoso y diseño de sostenimiento. Se puede decir que la presente investigación es de carácter descriptivo en tanto que ella busca no sólo conocer y descubrir lo referente características físico- mecánicas a tomar en cuenta en su aplicación, sino también la aplicación de procedimientos diseño previsto y el instalado, que repercutirá en resultados eficientes en la para la evaluación de las operaciones.

La investigación se fundamentará en datos obtenidos de fuentes primarias que “Son todas aquellas de las cuales se obtiene información directa, es decir, de donde se origina la información.” Información de fuentes secundarias “Es aquella información que se obtiene sobre el tema por investigar, pero que no son una fuente de la situación actual de los hechos del objeto de estudio si no que sirven como referencia. Dentro de las principales fuentes de información secundaria se dispone de libros, revistas, documentos escritos, documentales, noticieros y medios de información.”

2.2 DETERMINACION DEL UNIVERSO Y LA MUESTRA

“La población se refiere a la totalidad de los elementos que poseen las principales características objeto de análisis y sus valores son conocidos como parámetros.”

La cual es finita, debido a esto “La muestra no es más que una parte del todo que llamamos universo y que sirve para representarlo”. En la presente investigación se tomará una muestra no probabilística la cual se describe como una muestra dirigida, en donde la selección de elementos depende del criterio del investigador. Sus resultados son generalizables a la muestra en sí. No son generalizables a una población. Por lo anterior la muestra a evaluar estará constituida por: la caracterización del macizo rocoso, diseño de sostenimiento y los métodos a emplear en distintos casos.

La primera etapa consiste en recopilar información teórica respecto a los parámetros geomecánicos que caracterizan los macizos rocosos de acuerdo con el Q-system, (Bieniawski, 1993) y el (Barton, 2002).

Respecto a los escenarios seleccionados para análisis, éstos corresponden a condiciones de macizo rocoso de bajo a mediano grado de fracturación y condiciones de esfuerzo bajas a intermedias. Estos escenarios corresponden al rango del Geological Strength Index (GSI) de 20 a 70 (Figura 1-1). Con este criterio acotado de escenarios es posible enfocarse en el análisis de mecanismos de falla controlados principalmente por las estructuras del macizo rocoso para el **Proyecto Tambomayo, ubicado en el distrito de Castilla en el departamento de Arequipa.**

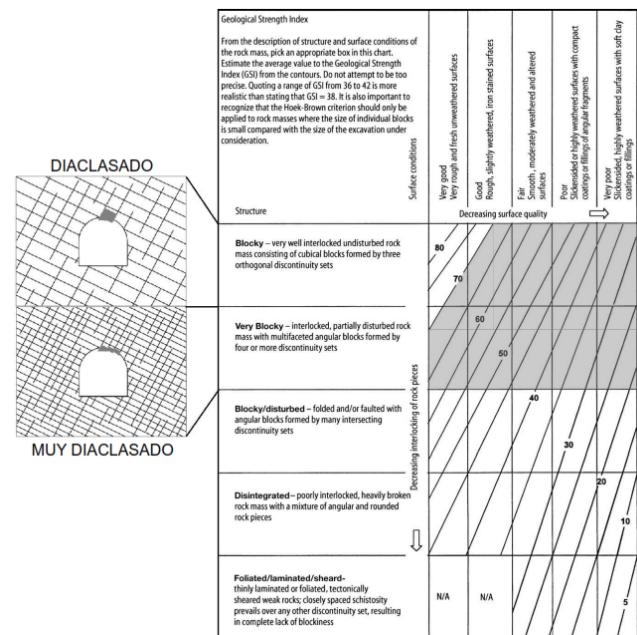


Figura 1-1 Descripción de escenarios de macizos rocosos considerados sobre diagrama GSI. Modificado de (Marinos et al., 2007)

2.3 MÉTODOS DE SOSTENIMIENTO

Para determinar el sostenimiento de un túnel es necesario hacer un detallado diseño del mismo. Este diseño se basa fundamentalmente en dos tipos de métodos: métodos empíricos, que utilizan la experiencia como base del diseño y

métodos numéricos, en los que se emplearan fórmulas matemáticas que permiten diseñar modelos cada vez más complejos. Es innegable el tremendo auge de estos últimos, pero parece que ya se asume que no se debe ni puede prescindir de los métodos empíricos, mediante clasificaciones, que permiten hacer un prediseño más o menos adecuado.

A continuación, se resumen y analizan las principales clasificaciones que se usan hoy en día, y que son la base de este trabajo de investigación.

2.3.1 MÉTODOS EMPÍRICOS DE SOSTENIMIENTO

Los métodos empíricos de sostenimiento son recomendaciones de diseño ligados a la caracterización geomecánica del macizo rocoso. Estos métodos definen el tipo y cantidad de elementos de sostenimiento a emplear.

Estos métodos tienen una serie de ventajas; su uso está muy extendido, son muy sencillos de utilizar en las primeras fases de proyecto y normalizan el sostenimiento a emplear. Entre ellos destacan algunos métodos y estos son de los que nos vamos a valer para la definición de este trabajo, con el Q-system, (Bieniawski, 1993) y el (Barton, 2002).

Es necesario conocer las limitaciones de la clasificación del macizo rocoso (Palmstrom & Broch, 2006) y que su uso no puede reemplazar algunos de los procesos de diseño más elaborados.

2.3.1.1 PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

La caracterización geotécnica del macizo rocoso ha sido realizada usando la valoración del macizo rocoso (RMR) (Bieniawski, 1993). Las valoraciones de RMR han sido registradas de testigos de perforaciones geotécnicas y mapeos por línea de detalle o celdas, y a partir de estos valores se estimaron los valores de índice de Resistencia Geológica (GSI) (Marinos et al., 2007) para cada unidad litológica.

A partir de muestras representativas de testigos de perforaciones se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar la masa de roca. Los principales ensayos de laboratorio para caracterizar la roca intacta han sido la resistencia a compresión uniaxial (UCS), ensayos triaxiales y ensayos de tracción para determinar el parámetro m , necesario para la estimación de los parámetros de (Evert Hoek, Carranza, & Corkum, 2002)

El programa Roclab desarrollado por Rocscience fue usado para la estimación de los parámetros m , s y a ; donde m es un valor reducido de la constante m_i ; s y a son constantes del macizo rocoso.

Los parámetros estimados consideran un factor de perturbación $D=0.80$ tomando en cuenta la voladura controlada y basado en la sugerencia de (Evert Hoek et al., 2002). El factor D típicamente varía desde 0 para macizo rocoso no perturbado hasta 1 para macizo rocoso con alta perturbación debido a los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos.

Una vez determinada los parámetros de Hoek-Brown de macizo rocoso, se puede calcular los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb con ayuda del programa RocLab.

2.3.1.2 BIENIAWSKI (1973, 1989)

En este sistema el índice RMR se consigue con la suma de cinco números (Rmr, 1958). Estos cinco números van en función de la resistencia a compresión simple de la roca matriz, el RQD, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición de las discontinuidades, la condición del agua y la orientación de las discontinuidades. Dependiendo del estado de las características indicadas, conseguirán una puntuación determinada y mediante la suma de dichas puntuaciones se conseguirán unos valores, que se situarán entre 0 y 100.

A partir de los datos de los índices RMR se pueden obtener lo siguiente:

- Una aproximación del tiempo de estabilidad de excavaciones sin soporte (Figura 2-1).
- Recomendaciones para el sostenimiento de túneles en forma de arco de herradura con 10m de ancho, construido por el sistema convencional (voladura), siempre y cuando la presión vertical sea inferior a 25MPa (250kp/cm²) y sea equivalente a un recubrimiento de 100m y asumiendo una $\gamma = 2,7$ t/m³; $\sigma_V = 27$ kg/cm².
- Correlaciones con otras propiedades del macizo rocoso.
 - ✓ Módulo de deformabilidad "in situ"
 - $EM(\text{GPa}) = 2\text{RMR} - 100$ (si $\text{RMR} > 50$) (Bieniawski, 1978)
 - $EM(\text{GPa}) = 10^{(\text{RMR} - 10)/40}$ (Serafin y Pereira, 1983)
 - ✓ Parámetros de resistencia del criterio de rotura Hoek-Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$
 C = resistencia a compresión simple de la roca matriz.
 m, s = parámetros relacionados con el grado de imbricación y fracturación del macizo rocoso.

✓ Para macizos poco alterados (perforados con máquina tuneladora):
 $m = mi \exp((RMR-100)/28)$ $s = \exp((RMR-100)/9)$

✓ Para macizos más alterados (excavados con voladura):
 $m = mi \exp((RMR-100)/14)$ $s = \exp((RMR-100)/6)$

mi: es el valor de m para la roca matriz (Hoek y Brown, 1980)

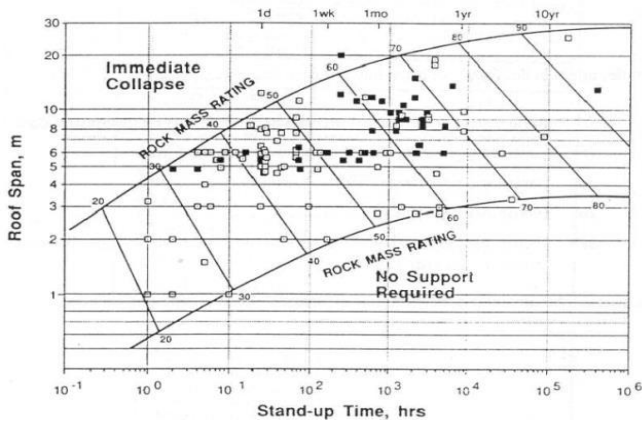


Figura 2-1. Tiempo de estabilidad de excavación sin soporte.

2.3.1.3 BARTON, LIEN Y LUNDE, 1974 (Q)

Este sistema fue desarrollado mediante el análisis de un gran número de excavaciones subterráneas, fue propuesto para la caracterización del macizo rocoso y las necesidades de sostenimiento en túneles.

Este sistema establece a cada terreno un índice de calidad (Q), dicho índice será mayor cuando mejor es la calidad del macizo rocoso. Su numeración varía en escala logarítmica, siendo Q=0,0001 para terrenos muy malos y Q=1000 para terrenos muy buenos (Hoek, 2007).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Siendo cada parámetro lo siguiente:

- RQD: Índice de calidad del macizo rocoso (Deere et al., 1963-1967)
- Jn: Número de familias de juntas en el macizo rocoso.
- Jr: Rugosidad de las juntas.
- Ja: Grado de alteración de las paredes de las juntas del macizo rocoso.
- Jw: Presencia de agua en el macizo rocoso.
- SRF: "Stress Reduction Factor", estado tensional del macizo rocoso que atraviesa un túnel.

Una vez obtenido el valor de Q y gracias a la dimensión equivalente, estos dos datos se ingresan en la (Figura 2-2) y así se obtendrá el tipo de sostenimiento necesario.

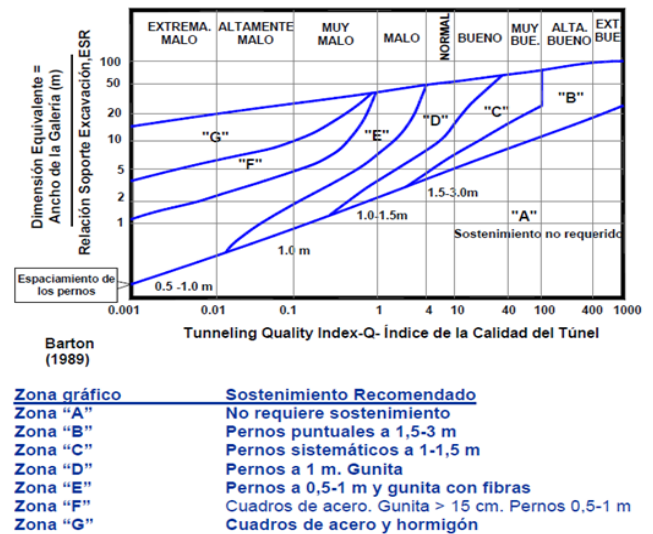


Figura 2-2. Relación entre Q y ESR y sostenimiento recomendado (Barton, 1989).

2.3.2 METODOS NUMÉRICOS DE SOSTENIMIENTO

Los métodos numéricos son sin duda unos de los más fiables de los que se dispone hoy en día para realizar un buen diseño del sostenimiento de túneles y otras excavaciones subterráneas. Cabe citar los métodos de diferencias finitas y los de elementos finitos. Programas de diferencias finitas como el FLAC (2D y 3D) de ITASCA (ITASCA, 2016) o el programa de elementos finitos Phase2 (RS2), de Rocscience, son de aplicación extendida a nivel mundial.

Mediante el programa Phase 2 se ha modelizado una formación correspondiente a la galería Cx 557N del nivel de extracción Nv. 4840. Esto se ha realizado para conocer la estabilidad natural de dicha formación y una vez realizada la excavación. A partir del sostenimiento descrito mediante los métodos empíricos de sostenimiento, se conocerá si esa formación es estable o el sostenimiento descrito es insuficiente.

El Phase2 es un potente programa en 2D basado en elementos finitos para aplicaciones en suelo y rocas. El Phase2 se puede usar para un amplio rango de proyectos de ingeniería, incluyendo; diseños de excavaciones, estabilización de laderas, filtraciones de aguas subterráneas, análisis probabilísticos, consolidación y análisis dinámicos de capacidad.

Modelos complejos divididos en varias etapas, pueden ser fácilmente creados y rápidamente analizados gracias al Phase 2 (túneles con calidad de roca muy baja, grandes cavernas subterráneas, minas a cielo abierto, etc). A dichos modelos

se les pueden añadir fallas progresivas, interacción de sostenimiento y otra gran variedad de problemas.

El Phase 2 ofrece gran variedad en la capacidad de modelización de sostenimiento. Pueden aplicarse elementos de sostenimiento tales como gunita, hormigón proyectado, sistemas de acero, muros de contención, pilotes, sostenimiento compuesto de multicapas de materiales tipo composite, geotextiles y muchos más.

Las herramientas de diseño de sostenimiento incluyen gráficos que muestran la capacidad de sostenimiento, que te permiten determinar el factor de seguridad del sostenimiento reforzado. Los tipos de bulones incluyen; anclaje final, anclaje repartido a lo largo del bulón (fully bonded, bulones con lechada), cables, bulones de anclaje del tipo split sets, y anclajes puntuales.

El Phase2 incluye un estado estable, donde el análisis de la filtración de agua subterránea mediante elementos finitos forma parte del propio programa. No siendo necesario el uso de otro programa de análisis de aguas subterráneas y del nivel de las mismas. Se determina la presión de poro, así como el flujo y el gradiente, basándose en condiciones hidráulicas de contorno definidas y en la conductividad del material. La presión de poro resultante automáticamente es incorporada dentro del análisis tensional (Rocscience, 2016).

2.4 APLICACIÓN DEL DISEÑO DE SOSTENIMIENTO EN LOS TÚNELES

Los criterios de diseño considerados para la elaboración de los trabajos de campo fueron los siguientes:

CRITERIO	VALOR	FUENTE
Sección de la galería	3 x 3 m	Buenaventura
Longitud de estudio	11 m	Buenaventura

Tabla 1-1. Recolección de datos

✓ SEGÚN BIENIAWSKI (1973, 1989)

RMR		22	OBSERVACIONES
CLASE		IV MALA	
EXCAVACION (PASE)		Avance (1/1,5m) y destroza. Sostenimiento Simultáneamente con la excavación, hasta 10m del frente.	

SOSTENIMIENTO	BULONES	Sistémicamente en clave y hastiales. L=4/5m. Espaciados 1/1,5m. Mallazo	
	HORMIGÓN PROYECTADO	Clave= 100/150 mm. Hastiales= 150mm.	El concreto lanzado se colocará como revestimiento final del túnel en la zona de derrumbe, que embeberá totalmente las cerchas de acero.
	CERCHAS METALICAS	Ligeras a medias. Espaciadas 1,5m.	Son indispensables las barras de conexión entre cimbras.

Tabla 1-2. Análisis de resultados según métodos empíricos.

El valor de Q correspondiente a esta formación tiene un valor de **0.30**, que nos indica que es un macizo rocoso muy malo.

Con este valor y el ESR (Relación soporte excavación) se realiza una relación que nos dará el valor correspondiente para el cálculo del sostenimiento necesario en esta zona. En este caso el De tiene un valor de 6.875

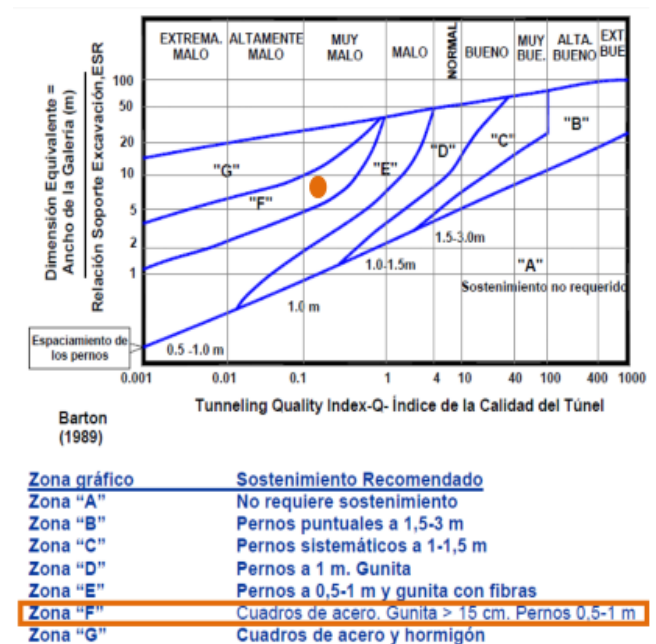


Figura 2-3. Relación entre Q y ESR y sostenimiento recomendado (Barton, 1989)

El sostenimiento necesario para este caso es:

- Cuadros de acero.
- Gunita con un espesor mayor a 15cm
- Pernos con una separación de 0,5/1m.

3. RESULTADOS

3.1 DISEÑO DE SOSTENIMIENTO

Se ha realizado el diseño de sostenimiento de forma numérica, además de los métodos empíricos, mediante el programa Phase2 de Rocscience.

Esto se ha realizado para conocer la estabilidad de la formación excavado y observar si su factor de seguridad es el recomendado o está por debajo de él, en dicho caso se procederá a la colocación del sostenimiento recomendado. Así se podrá definir si dicho sostenimiento es el necesario o es necesario un sostenimiento de mayor potencia. (Martinech, 2014)

Con la finalidad de garantizar la estabilidad, se ha diseñado el sostenimiento necesario para soportar la carga de material suelto por encima de la bóveda del túnel.

Considerando la geometría del túnel, altura de encampane y el tipo de material existente, se ha realizado un modelamiento numérico de elementos finitos con el programa Phases2D, con la finalidad de estimar los niveles de presiones en el perímetro del túnel que ejerce el material derrumbado, estimándose que las presiones varían entre **0.08 MPa** en los hastiales y **0.26 MPa** en la bóveda del túnel, los mismos que pueden ser visualizados en la siguiente figura

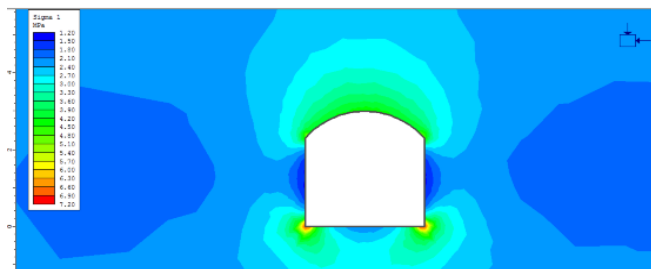


Figura 2-4. Esfuerzo principal mayor alrededor del túnel

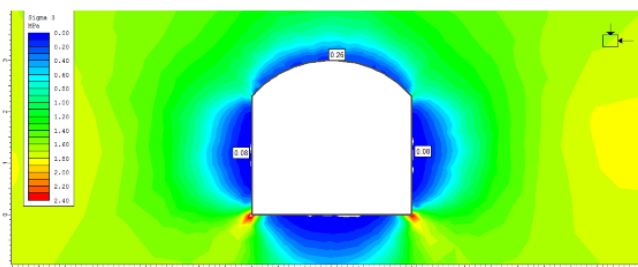


Figura 2-5. Esfuerzo principal menor alrededor del túnel en MPa

Considerando las presiones del terreno sobre el túnel y utilizando el programa SAP2000, se ha estimado los niveles de esfuerzo para el sostenimiento requerido, considerando que las cimbras de acero tipo omega, con sección THN-29 y el uso de concreto lanzado para el refuerzo definitivo.

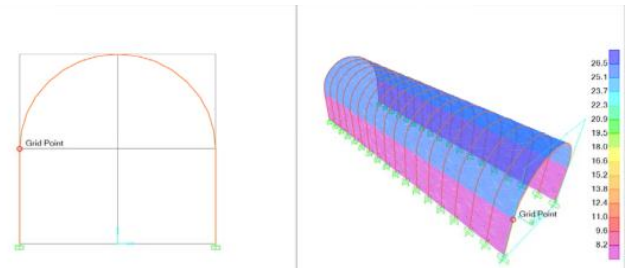


Figura 2-6. Presiones del terreno en los hastiales y el techo del túnel

A continuación, se muestra los momentos, esfuerzos axiales y cortantes del sostenimiento recomendado, para garantizar la estabilidad de la excavación en el largo plazo, donde se verificó que en todos los casos de esfuerzo que ejerce el terreno son menores a los que ejerce el sostenimiento recomendado.

- ✓ El momento máximo de la presión del terreno (492 kg-m) es menor al momento máximo resistente del sostenimiento (4512 kg-m).
- ✓ La fuerza cortante máximo de la presión del terreno (676 kg) es menor a la fuerza cortante del sostenimiento (53840 kg).
- ✓ La fuerza axial máxima de la presión del terreno (5570 kg) es menor a la fuerza axial del sostenimiento (164000 kg).

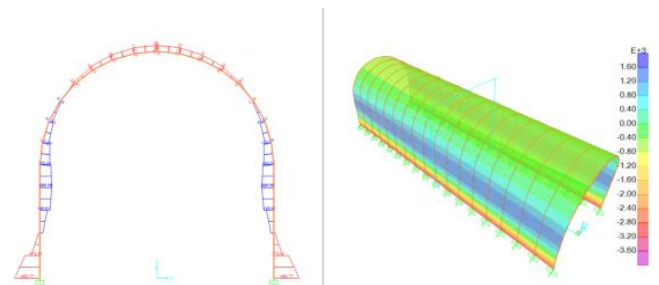


Figura 2-7. Diagramas de Momento (Kg-m) de la Cercha

- ✓ Momento máximo cimbra (presión terreno) = 492 kg-m
- ✓ Momento máximo resistente (perfil THN 29) = 4512 kg-m
- ✓ Momento máximo tunel 3D (presión terreno) = 3600 kg-m/m

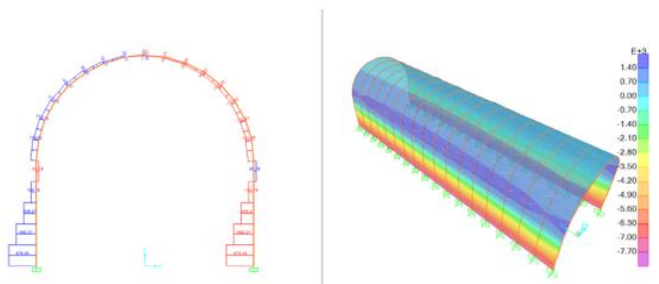


Figura 2-8. Diagramas de Fuerza Cortante (Kg) de la Cercha

- ✓ Fuerza cortante máximo cimbra (presión terreno) = 676 kg
- ✓ Fuerza cortante máximo resistente (perfil THN 29) = 53840 kg
- ✓ Fuerza cortante máximo cascaron (túnel) = 7700 kg/m

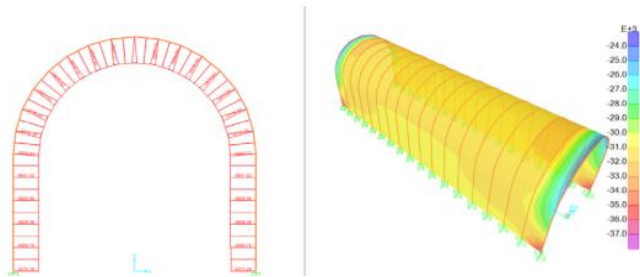


Figura 2-9. Diagramas de Fuerza Axial (Kg) de la Cercha
 ✓ Fuerza axial máximo cimbra (presión terreno) = 5570 kg
 ✓ Fuerza axial máximo resistente (perfil THN 29) = 164000 kg
 ✓ Fuerza axial máximo cascarron (túnel) = 32000 kg/m

Longitud	11	m
Long. Con cerchas	11	m
Espaciamiento promedio	0.6	m
Long. Con cerchas	10	M
Espaciamiento promedio	1	M
Total, cerchas	28	C/U

Tabla 1-3. Cerchas Metálicas Tipo Omega

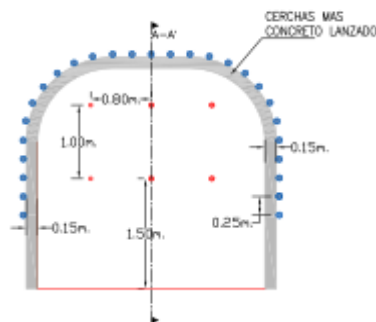


Figura 2-10. Diseño de sostenimiento vista frontal

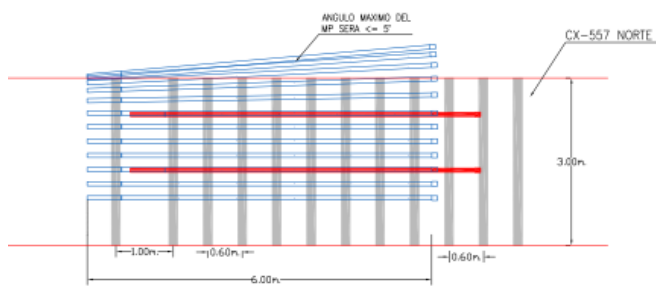


Figura 2-11. Diseño de sostenimiento vista transversal

5. CONCLUSIONES

- ✓ Es necesario comprender las implicancias del uso de metodologías empíricas en la ingeniería de túneles, entendiendo estas herramientas como una parte del proceso de diseño. Los resultados obtenidos se deben compatibilizar con los de otros análisis de estabilidad y asimilando la idea de que el desarrollo del diseño de túneles es un proceso continuo, de la mano con la construcción de la obra.

- ✓ El material del túnel a estudio corresponde a una grava con arena, arcilla y clastos con fuerte alteración química, con altos contenidos de humedad a saturado.
- ✓ Las presiones que ejerce el material están alrededor de 0.08 a 0.26 MPa.
- ✓ Se ha realizado una revisión de los posibles diseños de sostenimiento en túneles, con el fin de mostrar la variabilidad en las propuestas según el autor en que se base el diseño o la clasificación geomecánica utilizada. Se han mostrado aspectos tan importantes como las limitaciones de algunos métodos, pese a lo cual se emplean sistemáticamente en cálculos de sostenimiento en minería, incluso en casos en que los propios autores que los proponen descartan su aplicación.
- ✓ Más aún, los métodos numéricos deberían servir para corregir las propuestas empíricas y afinar o ajustar más en el diseño del sostenimiento, pues se comprueba que en ocasiones las clasificaciones dan propuestas de diseño que dan lugar a elevados factores de seguridad. En este sentido, la experiencia debería contribuir a “reajustar” esos diseños.

6. AGRADECIMIENTO

- ✓ Primeramente, agradezco infinitamente a Dios, quien me protegió, me iluminó y me dio las fuerzas para superar todas las dificultades que se me presentaron, permitiéndome alcanzar una de las metas en mi vida.
- ✓ Asimismo, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por sus consejos y sabias enseñanzas que me impartieron dentro de las aulas Universitarias.
- ✓ A la Universidad Nacional del Altiplano Puno, mi Alma Mater que me tuvo entre sus aulas durante los años de mi formación profesional, otorgándome parte del conocimiento que eh adquirido y que me servirá en mi desenvolvimiento profesional.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abad, A., & Huisa, F. (2011). *Procedimientos de excavación y sostenimiento de túneles proyecto derivación Huascacocha – Rimac*. 181.

Agency, P. (1972). *Functional Classification of Gouge Materials*.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 185–216. <https://doi.org/10.1016/S1365->

- 1609(02)00011-4
- Bieniawski, Z. T. (1993). Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In *Comprehensive rock engineering. Vol. 3*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-042066-0.50028-8>
- Calcina, E. (2018). *Diseño y Sostenimiento del bypass 942 (nivel 3340) Para Optimizar la Seguridad de las Operaciones en la Mina Chipmo. 942(Nivel 3340)*, 92.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *11*(3), 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Hoek, Evert, Carranza, C., & Corkum, B. (2002). Hoek–brown failure criterion – 2002 edition. *Narms-Tac*, 267–273. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91782-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91782-3)
- Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Underground Works under Special Conditions - Proceedings of the Workshop (W1) on Underground Works under Special Conditions*, (January 2015), 13–21. <https://doi.org/10.1201/noe0415450287.ch2>
- Martinech, A. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE REQUERIMIENTOS DE SOPORTE Y FORTIFICACIÓN DE TÚNELES DEFINIDOS SEGÚN MÉTODOS EMPÍRICOS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA VERSUS MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS. MEMORIA. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, *8*(33), 44.
- Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica*. (2016).
- Palmstrom, A., & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *21*(6), 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.005>
- Rmr, S. (1958). *El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas 1*.